

# ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА КОЛЕБАТЕЛЬНО–НЕРАВНОВЕСНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ МОЛЕКУЛЫ CO<sub>2</sub>

К. И. Аршинов<sup>1</sup>, О. Н. Крапивная<sup>1</sup>, В. В. Невдах<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск

E-mail: itaaki@yandex.ru, krapolya@gmail.com, v.v.nev@bk.by

В работе представляется методика многочастотного зондирования колебательно-неравновесной газовой смеси, содержащей молекулы CO<sub>2</sub>. Выражение для ненасыщенного коэффициента усиления (КУ) в центре линии переходов  $00^01-[10^00,02^00]_{I,II}$  молекул CO<sub>2</sub> в колебательно-неравновесной газовой смеси может быть записано в виде

$$K_{(1i,2i)} = f(N_m, N_{n1,2}, T), \quad (1)$$

где индекс 1 относится к переходу  $00^01-10^00$ , индекс 2 – к переходу  $00^01-02^00$ ,  $m$  – к верхнему лазерному уровню,  $n$  – к нижнему уровню (полное выражение см. в [1]). Если КУ для колебательно-неравновесной среды измерены, то в (1) неизвестными величинами остаются температура газа  $T$  и населенности колебательных уровней  $N_m$  и  $N_{n1}, N_{n2}$ . Связь между искомыми параметрами  $\{N_{n1}, N_{n2}, N_m, T\}$  и результатами измерений КУ  $\{k_{1i}, k_{2i}\}$  на линиях обоих переходов определяется системой уравнений

$$\begin{cases} k_{1i} = K_{1i}(N_{n1}, N_m, T), \\ k_{2i} = K_{2i}(N_{n2}, N_m, T), \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_{1i}$  и  $k_{2i}$  – результаты  $i$ -го измерений КУ. Система уравнений (2) может быть решена методом наименьших квадратов путем минимизации функционала

$$Z = \sum_{i=1}^S w_{1i} (k_{1i} - K_{1i})^2 + \sum_{i=1}^S w_{2i} (k_{2i} - K_{2i})^2, \quad (3)$$

где  $w_{1i}$  и  $w_{2i}$  – весовые коэффициенты. Для любой заданной температуры  $T$  условиям минимума соответствует система линейных уравнений

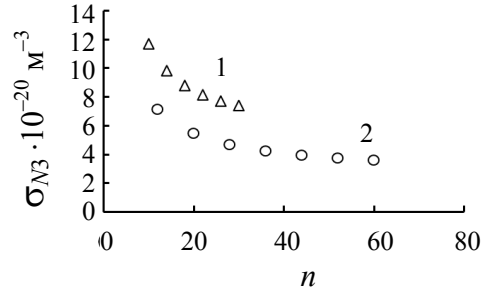
$$\begin{cases} -N_{n1} \cdot H_1 + N_m \cdot H_2 = H_3, \\ -N_{n2} \cdot H_4 + N_m \cdot H_5 = H_6, \\ -N_{n1} \cdot H_7 - N_{n2} \cdot H_8 + N_m \cdot H_9 = H_{10}, \end{cases} \quad (4)$$

где коэффициенты  $H_1 \div H_{10}$  представляются через параметры, входящие в выражения (1) и из-за их громоздкости не приводятся. Расчет КУ производился на основании выражения (1). За счет наложения гауссова шума на рассчитанные КУ формировались «экспериментальные» КУ  $\{k_{1i}, k_{2i}\}$ . Уровень шума определялся в процентах от минимального КУ в рассматриваемом спектральном диапазоне и был принят равным 3 %, что приблизительно соответствовало среднему квадратическому отклонению

(СКО)  $\sigma_k = 0.02 \text{ м}^{-1}$ . На рис. 1 приведены зависимости СКО населенности уровня  $00^01$   $\sigma_{N_m}$  от количества линий  $n$  для  $\sigma_k = 0.02 \text{ м}^{-1}$ . Видно, что точность метода возрастает с ростом числа линий, а также в случае одновременного использования линий обоих переходов.

Рис. 1. Зависимость СКО населенности уровня  $00^01$   $\sigma_{N_3}$  от числа линий  $n$  для  $\sigma_k = 0.02 \text{ м}^{-1}$

1 – использованы КУ линий P- и R- ветвей перехода  $00^01-10^00$ ; 2 – использованы КУ линий P- и R-ветвей переходов  $00^01-10^00$  и  $00^01-02^00$



Системе уравнений (4), если она имеет решение, соответствует глобальный минимум  $Z$  (3). Из рис. 2 видно, что при инверсии, превышающей некоторое значение, глобальный минимум  $Z$  трансформируется в ложбину (рис. 2б), и населенность нижнего уровня  $10^00$  не может быть определена корректно. При рассмотрении зависимости  $\lg Z$  от населенностей уровней  $00^01$   $N_m$  и  $02^00$   $N_{n2}$  был получен аналогичный результат.

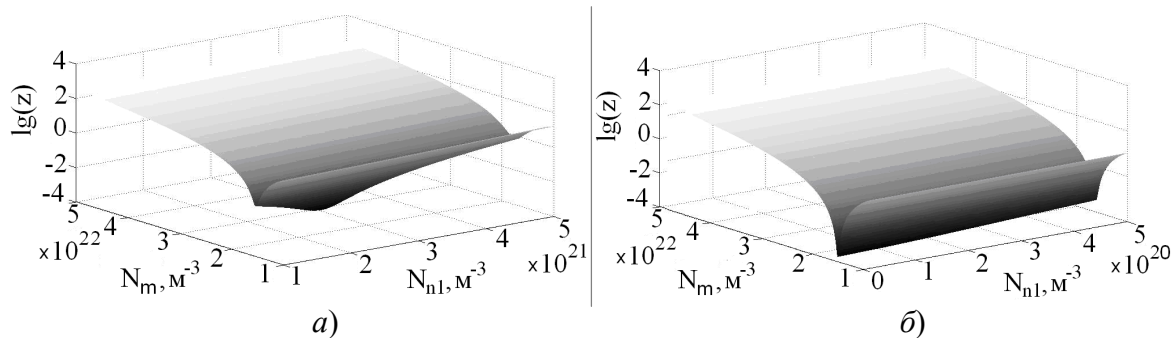


Рис. 2. Зависимости  $\lg(Z)$  от населенностей колебательных уровней  $00^01$   $N_m$  и  $10^00$   $N_{n1}$  при СКО измерения КУ  $\sigma_k = 0.02 \text{ м}^{-1}$ :  $N_m/N_{n1} = 10$  (а) и  $N_m/N_{n1} = 200$  (б)

Методика была применена для анализа результатов измерений коэффициентов усиления в активной среде  $\text{CO}_2$ -лазера с поперечным разрядом при давлении 80 Тор на линиях P- и R-ветвей переходов  $00^01-[10^00, 02^00]_{\text{I,II}}$  и переходов первой полосы секвенции  $00^02-[10^01, 02^01]_{\text{I,II}}$  работы [2]. Для уровней  $00^01$ ,  $10^00$ ,  $02^00$ ,  $00^02$ ,  $10^01$ ,  $02^01$  определено:

$$T = (366.8 \pm 0.3) \text{ К}, N_{001} = (1.816 \pm 0.01) \times 10^{22} \text{ м}^{-3}, N_{020} = (2.087 \pm 0.07) \times 10^{21} \text{ м}^{-3}, \\ N_{100} = (1.817 \pm 0.06) \times 10^{21} \text{ м}^{-3}; \\ T = (364.6 \pm 1.1) \text{ К}, N_{002} = (4.529 \pm 0.03) \times 10^{21} \text{ м}^{-3}, N_{021} = (3.359 \pm 0.04) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}, \\ N_{101} = (2.348 \pm 0.03) \times 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

1. Аршинов К. И., Лешенюк Н. С., Невдах В. В. // Квант. электр. 1998. Т. 25, № 8. С. 679–682.
2. Brimacombe R. K., Reid J. // IEEE J. Quant. Electron. 1983. V.19, No. 11. P. 1674–1679.